

广义相对论中的等效原理与时空观

江婷婷 涂泓 冯杰

(上海师范大学数理学院 上海 200234)

(收稿日期:2017-03-09)

摘要:等效原理是广义相对论建立的基本思想实验原理,它指出引力场和加速度的效应等价.在等效原理中有弱等效原理和强等效原理两个层次,弱等效原理和强等效原理之间存在一定的联系.以等效原理为基础将有助于理解爱因斯坦的时空观.

关键词:广义相对论 等效原理 时空观

1 等效原理

1.1 加速场与引力场

关于引力作用,伽利略的比萨斜塔实验就是一个很好的例子.伽利略在斜塔的顶端同时让不同质量的物体下落,观察到的现象是物体同时落地.所以我们这样推导一下:

由牛顿第二定律得出 $F = m_i g$, 根据万有引力定律 $F = \frac{GMm_g}{r^2}$, 其中 m_i 为惯性质量, m_g 为引力质量, r 为物体距地心的距离, M 为地球的质量, G 为引力常量. 由以上两式相等得出

$$\frac{m_i}{m_g} = \frac{GM}{gr^2}$$

已知地球上一切物体的重力加速度都为 g , 所以 $\frac{m_i}{m_g}$ 是一个常数, 在各量选取适当单位后, 可以得出这样的结论

$$m_i = m_g$$

即一个物体的惯性质量等于其引力质量.

电梯理想实验. 在摩天大楼内部自由下落的电梯里面有一个观察者(甲), 让他将手绢和书同时落下. 甲观察者看到书和手绢静止不动, 即仍保持在释放时的位置. 然而对于电梯外的观察者(乙)来说, 观察者甲、书和手绢同电梯一样, 以相同的速度下

落. 依据等效原理, 引力场中的物体运动不依赖于它的质量^[1].

我们称在引力作用下自由下落的参考系为局部惯性系. 在这样的局部惯性系下观察力学实验与太空中的宇宙飞船中观察力学实验没有什么区别, 好像没有了重力的影响(地球引力的影响), 运动的物体保持匀速直线运动, 静止的物体保持静止, 这也是惯性参考系的特征. 如牛顿第一定律所讲, 任何物体都保持静止的或匀速直线运动的状态^[2]. 这样定义的惯性系正是引力场中自由落体运动电梯里观察者甲所经历的情景.

1.2 等效原理

等效原理就是在一个引力场中自由降落的参考系内, 物体完全失重, 此参考系和一个没有引力场、没有加速度的惯性系等效, 任何物理实验都无法把二者区分开来^[3]. 根据等效原理, 我们可以得到以下3个结论.

(1) 在非惯性系构造一引力场, 就可作惯性系处理.

(2) 反之, 可设想一非惯性系来代替引力场.

(3) 让升降机在引力场中自由下落, 惯性力抵消引力, 从而消除引力场.

换句话说, 在地球上静止释放一物体, 物体会做自由落体运动且加速度为 g ; 倘若在太空中有一个

作者简介:江婷婷(1990-),女,在读硕士研究生,研究方向为学科(物理)教育.

指导教师:涂泓(1976-),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事天体物理和物理课程与教学论研究.

加速(加速度为 g) 的参考系也释放一静止物体, 物体加速度也会为 g , 这样的参考系中物理定律应该和具有引力作用星球中物理定律一样. 引力场与惯性场在有限大的区域中是可以区分的, 非惯性系中加速电梯的惯性力是平行的, 而地球表面电梯的惯性力是汇聚于球心的, 所以等效原理只是在无穷小的空间内适用, 有限大的区域内不适用.

1.3 弱等效原理

如上述所讲的“引力作用下自由下落的参考系为局部惯性系”, 简单来说就是 $m_i = m_g$ 以及由此而推来的加速度与引力场等效的原理. 任何力学实验不能区分引力和惯性力——引力与惯性力等效, 弱等效原理涉及的是力学实验与力.

1.4 强等效原理

在每一事件(时空点)及其邻域里存在一个局域惯性系, 即与在引力场中自由降落的粒子共同的参考系. 在此局域惯性系内, 一切物理定律服从狭义相对论的原理(如光速不变性、爱因斯坦延缓、洛伦兹收缩等)^[3]. 任何物理实验不能区分引力和惯性力——即惯性系和非惯性系不可能用物理实验来区分, 强等效原理涉及的是力与参考系.

1.5 强等效原理与弱等效原理

等效原理总起来讲的都是在一个局域内成立的. 强等效原理涉及的是任何物理定律, 包括力学实验, 而弱等效原理涉及的是力学实验与力, 所以说强等效原理是在弱等效原理基础上的延伸. 强等效原理的外延更广泛, 弱等效原理的外延比较少, 从种属关系上来说, 弱等效原理是强等效原理的一个属.

2 对时空的认识(空间弯曲)

等效原理是广义相对论建立的基础. 狭义相对论的基础是光速不变原理和狭义相对性原理, 它的结果只在惯性系下成立. 狭义相对论告诉我们, 空间和时间不是绝对的, 它们和参考系的运动有关也就是时空性质和物质的运动有关. 广义相对论的基础是爱因斯坦等效原理和广义相对性原理, 它的结果在惯性系和非惯性系中都成立. 广义相对论则告诉我们, 在引力物体的近旁, 空间和时间要被扭曲也就是物质本身决定时空的性质. 爱因斯坦建立了场方

程和运动方程, 后来又从场方程推出运动方程, 所以广义相对论的基本方程只有场方程. 引力就是弯曲时空的表现, 可观测到的现象有光的引力偏折、雷达回波延迟、引力红移、水星近日点的进动.

爱因斯坦的时空观已经超出了我们眼睛所能看到的时空, 在自由落体的过程中, 无论是质量大的物体还是质量小的物体, 他们的运动规律都是相同的. 爱因斯坦有一个大胆的设计: 之所以不同质量的物体运动规律相同, 与万有引力无关, 而是空间发生了弯曲, 如果物质消失了, 时空就回到不弯曲的状态. 爱因斯坦又对黎曼几何、闵可夫斯基四维空间进行研究, 欧几里得几何中表示两点之间直线最短, 但是在非欧几何中(弯曲空间)用短程线(又称测地线)来描述两点连线中最短的一条线^[4]. 现实生活中很难看到这样的空间, 但我们可以想象一下, 将一个足够光滑的床单 4 个人扯住 4 个角这就是一个二维空间. 我们放上去一个足够重量的玻璃球, 它会滚向中央, 此时二维空间就变成弯曲空间. 再放一个小玻璃球, 小玻璃球会滚向中央, 这是物体在弯曲空间中如何运动的模型, 如图 1 所示, 正如自由落体一般, 足够重量的玻璃球(简称为“大球”)吸引小球, 小球向大球运动. 这时的大球相当于地球, 而小球的运动相当于自由落体运动. 如果给小球一个切向初速度, 小球会围绕大球做旋转运动. 这种情况犹如地球绕太阳运动一般, 按照弯曲的空间理论, 地球是由于太阳周围弯曲的空间围绕太阳运动, 而不是受太阳引力作用围绕太阳运动^[5].

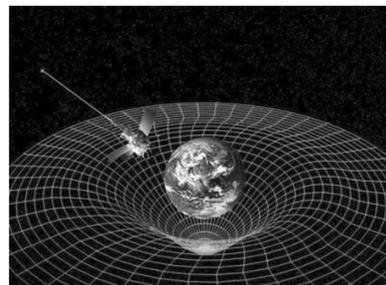


图 1 弯曲空间模型

我们试着用这种弯曲的空间来解释光的引力偏折、雷达回波延迟、引力红移、水星近日点的进动这几种现象.

2.1 光的引力偏折

在惯性系中, 光线沿直线传播, 但是在太空中

(非惯性系),空间符合四维空间模型,光线经过太阳附近时会“走弯路”.可见光在太阳附近会偏转,只有在日全食观察到.我们来观察图2,在地球上观察毕宿星群的位置是它们的视位置,但是毕宿星群的实际位置在视位置的下方,这是由于太阳引力导致的空间弯曲引起光线偏折.

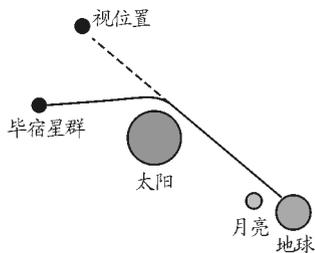


图2 光的引力偏折

2.2 雷达回波

我们知道光速不变原理中认为光速在任何情况下都是不变的,但是为什么会有雷达回波延迟这个现象呢?雷达回波延迟就是从地球向金星发出一个信号再接收从金星反射回来的信号,当太阳在地球和金星之间时再重复上述测量,两种情况比较后发现第二种情况下所需时间变长了.我们可以这样理解:太阳附近的时空被引力弯曲了不是因为光速变化了,而是空间发生了弯曲,距离变得更长了,所以才会有测量的时间更长这样的现象^[2].

2.3 引力红移

可见光范围内,从紫到红频率越来越低,这种光的频率减小的现象叫红移.原子的发光频率可看做是钟的计时信号,振动一次好比秒针走一格(一“秒”)^[2].宇宙中有一类恒星,体积很小,质量却很大,叫做矮星.矮星引力势比地球低得多,表面的时间进程比较慢,发光的频率比同种原子在地球上发光频率低,所以称这种现象为引力红移.时间进程比较慢的原因就是两点之间的距离在弯曲空间下变得更长,在光速不变的情况下,弯曲空间中所需时间长(相同距离时弯曲空间中时间走得慢)故而频率低.

2.4 水星近日点进动

牛顿理论认为水星的运动轨迹是椭圆这样一个二维平面内闭合的曲线,实际上天文观测得出的结论是水星运动轨道在二维平面内并不完全闭合,它会产生进动.那么我们通过太阳附近出现的弯曲空间来理解水星的运动.牛顿理论的椭圆运动如图

3(a)所示,我们对这样的二维空间切去一个小角度的三角形如图3(b)所示,然后将两个边重合如图3(c)所示.水星运动轨迹经过重合边界时在曲面上运动并不在二维平面中运动,经过空间弯曲对平方反比律的修正,计算结果与实际观测结果误差变小^[3].

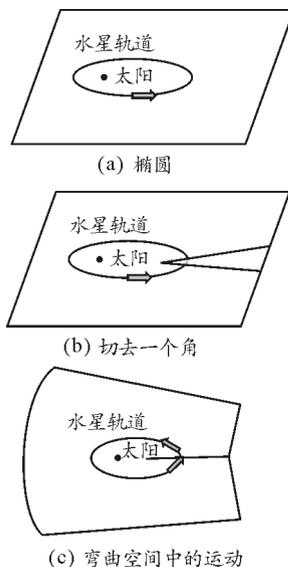


图3 水星近日点进动

3 结束语

广义相对论改变了我们的世界观,由可视的三维空间模型到时空四维空间模型是一个质的飞跃,在弯曲空间下引力偏折、雷达回波延迟、引力红移、水星近日点进动的现象得到解释.爱因斯坦用5年建立的狭义相对论,其他人也许可以做到,但是,10年左右建立的广义相对论,其他人花50年之久未必能做到.广义相对论凝聚了科学与智慧,大胆的猜想与谨慎的求证让科学之迷逐渐拨开迷雾.

参考文献

- 1 冯杰. 大学物理专题研究. 北京: 北京大学出版社, 2011. 314
- 2 张三慧. 大学物理(力学)(第2版). 北京: 清华大学出版社, 1999. 57, 351, 357
- 3 赵凯华. 新概念物理教程(力学). 北京: 高等教育出版社, 1995. 431, 435
- 4 赵峥. 爱因斯坦与广义相对论. 物理, 2015(10): 653
- 5 赵峥. 广义相对论的几个问题. 大学物理, 2011, 30(5): 18